www.ptcer.pl/mccm

MATERIAŁY CERAMICZNE /CERAMIC MATERIALS/, 61, 3, (2009), 173-178

Formowanie tworzyw ceramicznych metodą odlewania

Magdalena Gizowska, Mikołaj Szafran

Zakład Technologii Nieorganicznej i Ceramiki, Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej
e-mail: mgizowska@ch.pw.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne formowania tworzyw ceramicznych metodą odlewania, w której masa lejna odwzorowuje powierzchnię porowatej formy. Metoda odlewania jest metodą znaną i chętnie stosowaną w technologii ceramiki, w produkcji wyrobów sanitarnych oraz ceramiki stołowej. Jednakże trwają badania nad rozszerzeniem zastosowania tej metody przy produkcji „zaawansowanej ceramiki", tj.: do otrzymywania nanomateriałów i kompozytów ceramika-metal.

W celu otrzymania masy lejnej o optymalnych właściwościach, gwarantującej otrzymanie wyrobów pozbawionych defektów, wprowadzane są odpowiednie dodatki, tj.: upłynniacze, spoiwa oraz środki powierzchniowoczynne. W artykule opisano rolę poszczególnych składników masy oraz opisano mechanizmy upłynniania proszków ceramicznych.

Słowa kluczowe: odlewanie z gęstw, deflokulacja, upłynniacz, lepiszcze, nanomateriał

MOULDING CERAMIC MATERIALS WITH SLIP CASTING

In the paper, basic principles of slip casting are presented. Slip casting is a forming method in ceramic technology in which ceramic slurry poured into a porous mould replicates its negative. This method is well known and widely used in ceramic technology, in the manufacture of sanitaryware and tableware. However, the slip casting method may find application in production of advanced ceramic materials where research is carried out concerning the use of this forming method in obtaining nanomaterials and ceramic-metal composites.

In order to obtain slurry of the most beneficial properties – leading to obtaining ceramic bodies without defects – some additives are introduced into it. Generally additives are as follows: deffloculants, binders and surface active agents. In the paper, the role of each ingredient is described. Mechanisms of deflocculation of ceramic powder in liquid medium are described.

Keywords: Slip casting, Deflocculation, Deflocculating agent, Binder, Nanomaterial

Wprowadzenie

Metoda formowania z wykorzystaniem mas lejnych (z ang. *slip casting*) polega na odlewaniu zawiesiny proszku ceramicznego w formach porowatych. Medium ciekłe masy lejnej (rozpuszczalnik) dzięki siłom kapilarnym jest usuwane przez pory formy, w wyniku czego zagęszczony proszek ceramiczny osiada na ściankach formy odwzorowując jej negatyw. Metoda „slip casting" jest wykorzystywana do otrzymywania elementów ceramicznych o skomplikowanych kształtach oraz wyrobów cienkościennych.

Pod względem rodzaju formowanego materiału, metoda ta należy do uniwersalnych, ponieważ metodą „slip casting" można formować proszki zarówno zawierające materiały ilaste, jak i czyste proszki tlenkowe, węglikowe i inne, co czyni tę metodę popularną w technologii ceramiki. Jedynym ograniczeniem w stosowaniu danego proszku stanowi wielkość jego ziarna. Wyroby, którym nie stawiane są wysokie wymagania wytrzymałościowe mogą być otrzymywane z zawiesin proszków o średniej średnicy ziarna nawet do kilkudziesięciu mikrometrów. Jednak w celu otrzymania materiałów o wyższych parametrach wytrzymałościowych wykorzystuje się proszki o średnicy (d) do 5 μm z dużym udziałem proszku o średnicy około1 μm [1].

Wymagania stawiane wyrobom ceramiki specjalnej implikują stosowanie mikroproszków (0,1 μm < d < 1 μm). Większa liczba kontaktów między ziarnami zwiększa aktywność spiekania i zmniejszoną ilość wad w materiale o wysokiej gęstości i niskiej porowatości.

Prowadzone są także obiecujące badania nad formowaniem metodą „slip casting" nanoproszków (d < 100 nm). Wyroby z nanoproszków odznaczają się unikalnymi właściwościami fizycznymi (zwiększoną odpornością na kruche pękanie, wytrzymałością na zginanie i in.). Rozwój możliwości uzyskiwanych kształtów otrzymywanych nanomateriałów jakie daje metoda formowania „slip casting" jest wielkim krokiem w dziedzinie nanotechnologii [2-4].

Ponadto prowadzone są badania nad zastosowaniem metody „slip casting" do otrzymywania kompozytów ceramika-metal. Poprzez dobór właściwości masy lejnej na bazie mieszaniny proszku ceramicznego i metalicznego oraz warunków formowania, możliwe jest zapobieżenie sedymentacji cięższych cząstek metalu i otrzymanie kompozytu o równomiernej dystrybucji cząstek metalu w objętości wyrobu oraz otrzymanie kompozytu z gradientem funkcjonalnym – z gradientem stężenia cząstek metalu [5-7].

Właściwości masy lejnej

Właściwości otrzymanego wyrobu formowanego metodą „slip casting" zależą w znacznej mierze od jednorodności i stopnia zagęszczenia kształtki surowej. Natomiast właściwości produktu w stanie surowym wynikają z jakości masy lejnej. Podstawowe wymagania, jakie musi spełniać masa lejna to [8]:

– możliwie wysoka zawartość fazy stałej (uważa się, że 50%obj proszku w masie lejnej jest stężeniem wysokim),
– stabilność i brak skłonności do sedymentacji,
– stosunkowo niska lepkość (umożliwiająca dokładne wypełnienie formy),
– zdolność do upłynniania przy małym dodatku środków upłynniających,
– szeroki zakres upłynniania (gwarancja powtarzalności właściwości masy lejnej przy niewielkich wahaniach składu masy),
– dobra lejność (tworzenie zwartej strużki przy odlewaniu, która znika w powierzchni masy lejnej bez tworzenia pęcherzyków powietrza),
– duża zdolność do tworzenia czerepu,
– utworzony czerep powinien być zwarty i wytrzymały oraz powinien łatwo odchodzić od formy.

Dobór środka upłynniającego i innych dodatków dyktowany jest rodzajem proszku ceramicznego. Znajomość zjawisk zachodzących na powierzchni ziaren w środowisku rozpuszczalnika jest niezbędna dla prawidłowego zaprojektowania mas lejnych.

Skład masy lejnej

W skład masy lejnej oprócz proszku ceramicznego i rozpuszczalnika (w roli rozpuszczalnika stosowana jest zazwyczaj woda) wchodzą: upłynniacze, spoiwo i środki powierzchniowoczynne. Dąży się do tego, aby stosowane dodatki były nietoksyczne i nieszkodliwe dla środowiska naturalnego – nie tworzące szkodliwych gazów (w tym gazów cieplarnianych) podczas procesu wypalania.

Rola upłynniaczy

Kluczem do odpowiednio równomiernego zagęszczenia proszku ceramicznego w kształtkach w stanie surowym formowanego metodą „slip casting" jest odpowiednia dyspersja proszku w zawiesinie. W tym celu stosuje się substancje upłynniające.

Ziarna ceramiki są z reguły cięższe od medium dyspergującego (rozpuszczalnika), jednak wprowadzone dodatki powodują, że siły oddziaływań cząstka-cząstka przeważają nad siłami grawitacyjnymi i w rezultacie zawiesina cząstek ceramicznych odznacza się znaczną stabilnością w czasie i nie sedymentuje. Oddziaływania między cząstkami w masie lejnej można podzielić na:

– siły przyciągające wynikające z oddziaływań van der Waalsa między cząstkami;
– siły odpychające związane z istnieniem podwójnej warstwy elektrycznej na powierzchni cząstek;
– siły odpychające związane z obecnością zaadsorbowanych makrocząsteczek na powierzchniach cząstek ceramicznej [9, 10].

Pod względem mechanizmu upłynniania substancje upłynniające można podzielić na: jonowe, steryczne i elektrosteryczne.

Działanie upłynniaczy jonowych

Dyspersja cząstek ceramicznych w masach lejnych z dodatkiem określonych soli następuje, kiedy siły odpychające związane z istnieniem podwójnej warstwy elektrycznej przeważają nad siłami przyciągającymi van der Waalsa.

Oddziaływania van der Waalsa

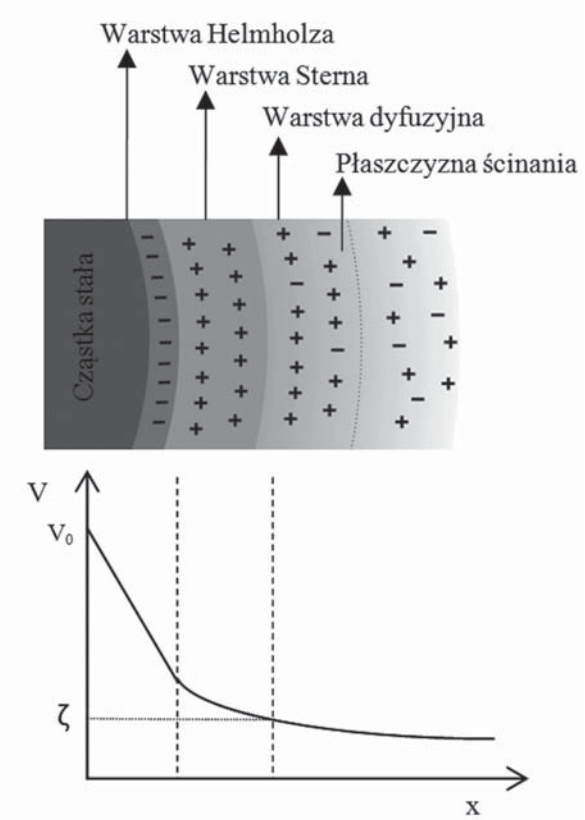
Oddziaływania van der Waalsa z definicji [11, 12] dotyczą oddziaływań między cząsteczkami lub atomami i dzielą się na oddziaływania: a) dipol-dipol, b) dipol-dipol indukowany (wynikający z polaryzowalności chmury elektronowej cząsteczki/atomu nie mającego trwałego momentu dipolowego), c) dipol indukowany-dipol indukowany (oddziaływania Londona). Charakter oddziaływań między cząstkami należy do oddziaływań Londona. Choć cząstki ceramiczne w zawiesinie są niewspółmiernie większe od atomów, oddziaływania makroskopowe są sumą pojedynczych oddziaływań między atomami wchodzącymi w skład ziaren [10].

Oddziaływania van der Waalsa silnie oddziałują na cząstki kiedy te zbliżą się do siebie na odległość ok. 5nm. W masach lejnych stosowanych w technologii ceramiki o wysokiej zawartości cząstek stałych, w wyniku ruchów termicznych bardzo często dochodzi do zderzeń cząstek, które następnie przyciągane siłami van der Waalsa tworzą aglomeraty osiadające na dnie naczynia. Aby uniemożliwić cząstkom zbliżenie się do siebie do obszaru oddziaływań przyciągających i stabilizacji dyspersji cząstek stosuje się różne metody zwiększające siły odpychania pomiędzy cząstkami, m. in. poprzez modyfikację podwójnej warstwy elektrycznej.

Podwójna warstwa elektryczna

W środowisku rozpuszczalnika powierzchnia zawieszonych cząstek ceramicznych wykazuje pewien ładunek, który może wynikać z adsorpcji jonów z rozpuszczalnika, przechodzeniem jonów fazy stałej do medium ciekłego, lub na skutek retrakcji kationów [1]. Ładunek na powierzchni cząstek jest równoważony przez jony przeciwnego znaku (z roztworu). Warstwa solwatowanych przeciwjonów sztywno związana z powierzchnią cząstki nazywana jest zewnętrzną warstwą Helmholtza lub (częściej) warstwą Sterna.

Warstwę Sterna otacza tzw. dyfuzyjna warstwa elektrochemiczna (warstwa Gouy'a; Rys. 1.). W pewnej odległości od powierzchni cząstki, w obszarze warstwy Gouy'a, potencjał elektryczny oddziaływania jonów z naładowaną powierzchnią cząstki stałej zmniejsza się na tyle, że jony zaczynają swobodny ruch względem powierzchni cząstki [8-11]. Tę odległość określa się jako płaszczyznę ścinania, a odpowiadająca jej wartość potencjału (względem potencjału w głębi roztworu) to potencjał ζ (dzeta; zależny od pH i rodzaju upłynniacza; niższy od potencjału powierzchni cząstki), który jest możliwy do wyznaczenia metodami elektroforezy lub elektroosmozy i spełnia następującą zależność:



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie podwójnej warstwy elektrycznej wokół cząstki w masie lejnej oraz zmiany potencjału (V) wraz z oddalaniem się od cząstki.
Fig. 1. Schematic representation of the electrical double layer around a particle in the slip slurry and potential (V) as a function of distance from the particle.

$$\zeta = \frac{4 \cdot u \cdot \pi \cdot \eta}{\varepsilon}$$

gdzie:
u – ruchliwość cząstek,
η – lepkość medium ciekłego,
ε – stała dielektryczna ośrodka.

W układach wodnych w środowisku kwaśnym powierzchnia cząstki obdarzona ładunkiem reaguje z jonami H_3O^+, które nadają cząstkom ładunek dodatni. Wraz ze wzrostem pH wartość ładunku spada – a wraz z nim następuje spadek potencjału elektrycznego między powierzchnią cząstki, a głębią roztworu (proporcjonalnego do potencjału dzeta). W środowisku zasadowym powierzchnia (i potencjał dzeta) przybiera ładunek ujemny. Wartość pH, przy której powierzchnia cząstki jest obojętna (a potencjał dzeta jest równy zero; masa koaguluje) określany jest mianem punktu izoelektrycznego (IEP – z ang. *Isoelectric Point*).

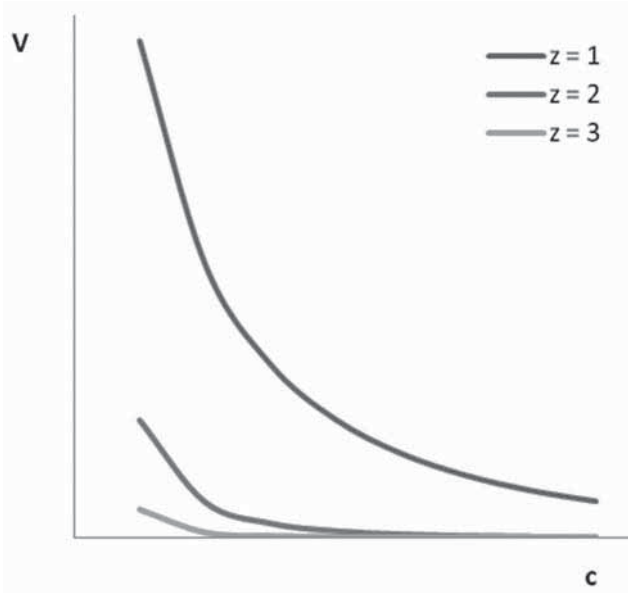
Spadek potencjału elektrycznego (V) wraz ze zwiększającą się odległością od powierzchni cząstki (x) w układzie koloidalnym jest opisywany równaniem Poissona z przybliżeniem Debye'a-Hückla [10]:

$$V = V_0 \exp(-\kappa x)$$

gdzie: V_0 – jest potencjałem powierzchni cząstki,

$$\kappa = \sqrt{\frac{F^2 \sum_i c_i z_i^2}{\varepsilon \varepsilon_0 RT}}$$

gdzie:
κ^{-1} – odległość Debye'a-Hückla,



Rys. 2. Zależność potencjału (V) od średniego stężenia przeciwjonu (c) w roztworze oraz od stopnia utlenienia przeciwjonu.
Fig. 2. Potential (V) as a function of average concentration of counterions (c) in the solution and of their oxidation state.

F – stała Faraday'a,
ε_0 – przenikalność elektryczna próżni,
ε – stała dielektryczna rozpuszczalnika
c_i – stężenie jonów,
z_i – stopień utlenienia i-tego przeciwjonu.

Z powyższych równań wynika, że potencjał jest tym wyższy im niższy jest stopień utlenienia jonów i niższe ich stężenie (Rys. 2.). Wynika to z tego, że przy niskim stężeniu jonów występuje większy gradient jego stężenia wraz z oddalaniem się od powierzchni cząstki (wyższy skok potencjału), ponieważ ilość jonów w warstwie Sterna jest teoretycznie zawsze taka sama i zależy od ładunku powierzchni cząstki (który musi być zrównoważony).

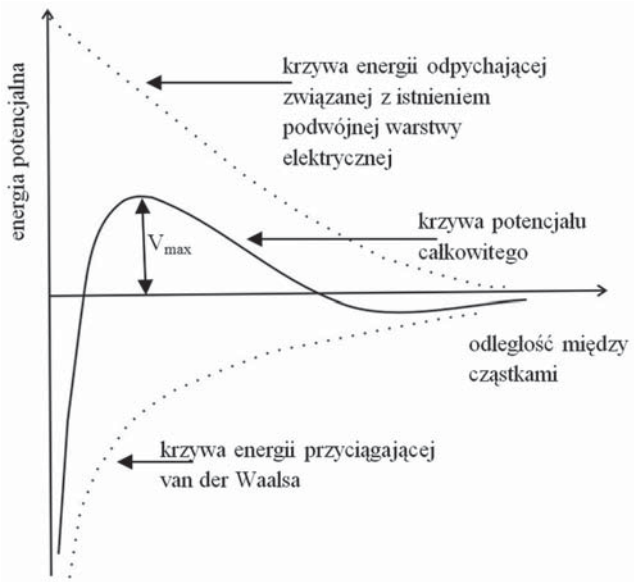
Natomiast wraz ze zwiększającym się ładunkiem przeciwjonu zmniejsza się ilość jonów warstwy Sterna (grubość warstwy) niezbędna do zrównoważenia ładunku cząstki, co powoduje koagulację zawiesiny.

Dlatego najlepszego upłynnienia należy się spodziewać dla jonów o dużym promieniu i niskim stopniu utlenienia. Na drodze eksperymentalnej ułożono kationy w kierunku wzrastającej aktywności koagulacyjnej otrzymując tzw. szereg E. Hofmeistera [8]:

$I^+ < Na^+ < K^+ < NH^{4+} < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Si^{4+} < Ba^{2+} < Al^{3+} < H^+$

Teoria DLVO

Stabilizację dyspersji zawiesiny poprzez działanie sił elektrostatycznych wyjaśnia teoria DLVO (jej nazwa powstała od skrótu nazwisk jej twórców: Dieriagin, Landau, Verwey, Overbek). Według tej teorii siły oddziaływań pomiędzy naładowanymi powierzchniami w medium ciekłym jest sumą przyciągających sił van der Waalsa i odpychających sił związanych z istnieniem podwójnej warstwy elektrycznej [8]. Zmianę potencjału wraz ze zwiększającą się odległością od powierzchni cząstki przedstawiono schematycznie na Rys. 3. Zawiesina będzie stabilna, kiedy energia ruchu termicznego będzie mniejsza od sił odpychających (V_{max}), a cząstki nie będą mogły się zbliżyć do siebie na odległość, w której siły



Rys. 3. Rozkład sumarycznego potencjału (potencjału oddziaływań van der Waalsa i sił odpychających związanych z istnieniem podwójnej warstwy elektrycznej wokół cząstek) w zależności od odległości między zbliżającymi się cząstkami.
Fig. 3. Total potential distribution, resulting from van der Waals interactions and repulsion forces connected to the double layer formed around the particle, as a function of distance between the particles coming closer.

van der Waalsa przeważają. Wtedy cząstki w zawiesinie odpychają się.

Wielkość potencjału odpychającego zależy od stężenia i rodzaju jonów w masie lejnej oraz od jej pH.

Stabilizacja steryczna cząstek w masie lejnej

Inną metodą stabilizacji zawiesiny jest metoda polegająca na wprowadzeniu do masy lejnej makrocząsteczek, które adsorbując się na powierzchni cząstek tworzą warstwę na tyle grubą, żeby cząstki nie mogły się do siebie zbliżyć, do zasięgu przyciągających sił van der Waalsa. Cząsteczki powinny być silnie związane z powierzchnią ziaren, aby powstała struktura nie uległa zniszczeniu podczas zderzeń cząstek (powodowanymi ruchami termicznymi i zabiegami technologicznymi) [1, 10, 11].

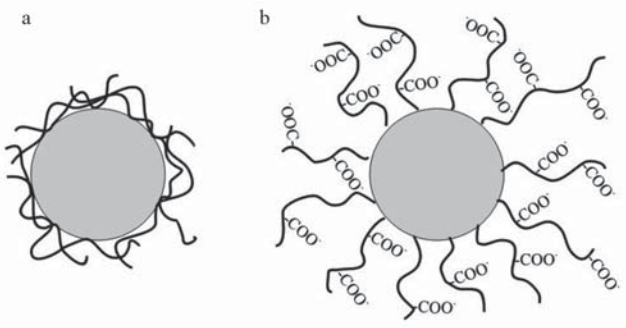
W masie lejnej z upłynniaczami sterycznymi może dojść do dodatkowego mechanizmu stabilizującego zawiesinę. Kiedy następuje wzrost stężenia zaadsorbowanych makrocząsteczek (podczas zbliżania się cząstek), ciśnienie osmotyczne powoduje dyfuzję rozpuszczalnika pomiędzy makrocząsteczki i w rezultacie rozdzielenie cząstek ceramiki [10, 11].

Stabilizacja steryczna jest szeroko stosowana w układach z niepolarnym rozpuszczalnikiem.

Podobny mechanizm wykazują cukry w roli upłynniacza w masach lejnych wykonanych z nanoproszków [2].

Stabilizacja elektrosteryczna cząstek w masie lejnej

Upłynniające działanie polielektrolitów (np.: kwas poliakrylowy, poliakrylan amonu lub sodu, polifosforany) łączy w sobie mechanizm stabilizacji sterycznej i elektrostatycznej



Rys. 4. Schematyczne przedstawienie stabilizacji elektrosterycznej polielektrolitów przy: a) niskim, b) wysokim pH – wysokim stopniu dysocjacji polielektrolitu.
Fig. 4. Fig. 4. Schematic representation of electrosteric stabilization of polyelectrolytes at: a) low pH, b) high pH - high dissociation degree of polyelectrolyte.

(jonowej). Związki te są polimerami z wieloma zdolnymi do dysocjacji grupami funkcjonalnymi (np.: z grupami karboksylowymi, sulfonowymi). Polielektrolit adsorbuje się na ziarnach ceramiki na drodze chemisorpcji lub fizysorpcji.

Zachowanie polielektrolitu różni się w zależności od zastosowanego środowiska. W przypadku polielektrolitu anionowego, przy niskich wartościach pH, cząsteczki ściśle otaczają upłynniane cząstki. Wraz ze wzrostem pH i postępującą dysocjacją grup funkcyjnych następuje „rozplatanie" łańcuchów pod wpływem odpychania się grup funkcyjnych łańcucha [10].

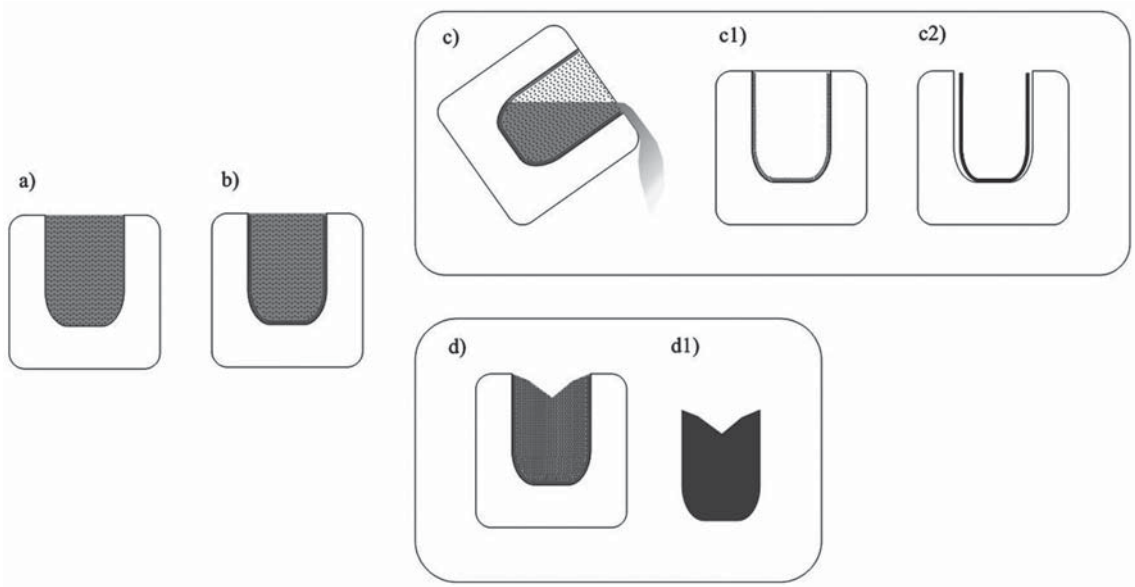
Rola spoiwa

Spoiwo dodane w niewielkiej ilości (poniżej 1%wag. w stosunku do fazy stałej) ma za zadanie nadanie odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej kształtce w stanie surowym. W przypadku formowania metodą „slip casting" dobór spoiwa dyktuje rodzaj stosowanego rozpuszczalnika.

W układach niewodnych często stosowanym spoiwem jest poli(butaral winylu) (PBW).

W przypadku układów wodnych często stosuje się poli(alkohol winylowy) (PAW), glikol polietylenowy (PEG), metyloceluloza, emulsje akrylowe (np.: Duramax™B1031). PAW, PEG i emulsje akrylowe nadają wysoką wytrzymałość kształtkom w stanie surowym i są stosowane gdy niezbędna jest obróbka kształtek w stanie surowym [13]. Dodatek spoiwa powoduje także wzrost lepkości fazy rozpraszającej co utrudnia sedymentację większych ziaren w ceramicznej masie lejnej.

Wprowadzenie makrocząsteczek spoiwa do masy lejnej nie pozostaje bez wpływu na jej zdolność do upłynniania. W przypadku spoiwa jakim jest poli(alkohol winylowy) – PAW, w łańcuchu polimerowym, obok grup –OH, występują także niezhydrolizowane grupy acetylowe ($-CH_3COO^-$), które mogą wiązać się z dodatnio naładowaną powierzchnią cząstki. W zależności od stopnia hydrolizy i długości łańcucha zmienia się wartość potencjału dzeta cząstek w masie lejnej. Przy niskim stopniu hydrolizy (z dużą ilością grup octanowych) potencjał dzeta – związany z obecnością sił odpychających pomiędzy cząstkami proszku - zmniejsza się, prawdopodobnie ze względu na ich wysoki stopień adsorpcji na centrach aktywnych cząstek stałych (przy preferowanych konforma-



Rys. 5. Schemat etapów procesu formowania przez odlewanie mas lejnych w formach gipsowych: a) forma napełniona masą, b) tworzenie się warstwy półfabrykatu przy ściankach formy, c) otrzymywanie wyrobów cienkościennych – usunięcie nadmiaru masy, c1-2) suszenie i zmniejszenie wymiarów kształtki pozwalające na łatwe wyjęcie z formy, d) otrzymywanie wyrobów pełnych.
Fig. 5. Scheme of the slip casting process in porous gypsum moulds: a) mould filled with slurry, b) formation of semi-finished product layer on the mold walls, c) manufacturing thin wall products - clearance of slurry excess, c1-2) drying and size decreasing of the cast profile enabling it to be easy removed from the mould, d) manufacturing full products.

cjach równoległych do powierzchni cząstki), co powoduje przesunięcie płaszczyzny ścinania w stronę powierzchni cząstki [14]. Efekt ten wzrasta wraz ze wzrostem długości łańcucha. Dla wielu zastosowań, optimum stopnia hydrolizy poli(alkoholu winylowego) znajduje się przy ok. 88%, kiedy poli(alkohol winylu) jest najlepiej rozpuszczalny w wodzie.

Rola środków powierzchniowoczynnych

W celu ujednorodnienia masy lejnej często niezbędne jest jej energiczne mieszanie. Podczas tego procesu masa lejna może ulec zapowietrzeniu. W gęstwie powstają pęcherzyki powietrza, które później tworzą wady (pory) w kształtce. Zabiegi związane z mechanicznym pozbyciem się pęcherzyków powietrza nie zawsze są wystarczające. W celu ich usunięcia, do masy dodaje się środki powierzchniowoczynne zmieniające napięcie powierzchniowe ceramicznej masy lejnej, np. środki antypienne (np.: *n*-alkohole). W technologii ceramiki proces odpowietrzania masy poprzez dodanie środka antypiennego często uzupełniany jest procesem jej odpowietrzania (usuwaniem pęcherzyków powietrza przy zastosowaniu podciśnienia).

Formowanie z mas lejnych

Przygotowaną masę lejną formuje się przy użyciu porowatych form (z gipsu, tworzywa ceramicznego wypalonego na biskwit lub tworzywa sztucznego), do których masa jest wlewana. Pory formy „odciągają" wodę (rozpuszczalnik), a na ściankach osadza się warstwa zagęszczonego proszku ceramicznego. Następnie, po wytworzeniu wymaganej warstwy proszku na ściankach formy, nadmiar masy lejnej jest wylewany lub proces narastania czerepu trwa do momentu aż nastąpi całkowite wypełnienie formy utworzonym czerepem (Rys. 5.). Po osiągnięciu przez odlew odpowiedniej wilgotności i wytrzymałości mechanicznej, wyrób usuwa się z formy i suszy w odpowiednich warunkach który następnie poddawany jest procesowi wypalania.

Proces formowania z mas lejnych można nazwać więc procesem polegającym na filtracji zawiesiny cząstek ceramicznych przez porowatą formę. Siłą napędową tego procesu jest ciśnienie ssania kapilarnego, którego wartość wynosi około 0,1-0,2MPa. W wyniku procesu pochłaniania cieczy przez porowatą formę, w stronę ścianki formy wraz z cieczą, porywane są także cząstki proszku - najpierw cząstki najdrobniejsze (gdy siła ssania kapilarnego formy jest największa). Przepuszczalność pierwszej warstwy proszku osadzonej na ściance formy determinuje wówczas szybkość całego procesu filtracji [9]. Proces przebiega właściwie, kiedy objętość porów formy jest równa bądź większa od objętości rozpuszczalnika [15]. Wtedy szybkość filtracji można uznać za stałą i jest on proporcjonalna do pierwiastka z czasu formowania [9].

Niektóre technologie wymagają zastosowania mieszanin proszków o stosunkowo dużej średnicy i ziaren mniejszych, których zadaniem jest zmniejszenie porowatości wyrobu poprzez wypełnienie przestrzeni między ziarnami grubymi. Przy stosowaniu mas lejnych na bazie proszku o szerokim rozkładzie wielkości cząstek zjawisko osadzania się cząstek lżejszych w pierwszej warstwie na ściance porowatej formy powoduje powstanie gradientu rozkładu wielkości cząstek w objętości wyrobu [17, 18]. Do niejednorodności rozkładu cząstek dochodzi także efekt sedymentacji cząstek o większych średnicach (cięższych). Taka niejednorodność może powodować powstanie poważnych wad w późniejszych etapach produkcji (w wyniku różnego stopnia zagęszczenia obszarów o różnym składzie granulometrycznym). Dla mas lejnych o szerokim rozkładzie wielkości cząstek najkorzystniejszą alternatywą jest odlewanie ciśnieniowe. Zazwyczaj stosuje się ciśnienie ok. 4 MPa gwarantujące jednorodność wyrobu (szybkość migracji cząstek o różnej średnicy i masie przy takim ciśnieniu jest porównywalna [17]).

W technologii ceramiki największą popularnością cieszą się formy gipsowe (zwłaszcza przy wytwarzaniu ceramiki użytkowej i sanitarnej). Wynika to z faktu, iż gips jest materiałem tanim i łatwym do zastosowania. Należy jednak dodać, że przy większej produkcji formy gipsowe zajmują dużo miejsca (konieczne jest utrzymanie odpowiednich warunków suszenia – temperatury i wilgotności – w dużym pomieszczeniu) oraz ze względu na proces korozji form gipsowych zachodzi potrzeba częstego ich wymieniania. Alternatywą dla form gipsowych są formy polimerowe. Pory w formie z tworzywa sztucznego wykazują większą średnicę, co skutkuje mniejszymi siłami kapilarnymi i mniejszymi szybkościami formowania. Dlatego często stosuje się dodatkowo zewnętrzne ciśnienie (odlewanie ciśnieniowe).

Podsumowanie

Metoda formowania przez odlewanie mas lejnych cały czas odgrywa wielkie znaczenie w technologii ceramiki, a jej zastosowanie rozszerzyło się do otrzymywania nanomateriałów i materiałów kompozytowych.

Zachowanie reologiczne mas lejnych jest tłumaczone przez chemizm oddziaływań cząstka-cząstka, cząstka-rozpuszczalnik i jest kontrolowana przez modyfikację powierzchni cząstek. Poznanie tych zjawisk pozwala także zrozumieć efekty starzenia się mas lejnych (zależące w głównie od ustalania się równowag na granicy faz) i projektować masy lejne utrzymujące swoje właściwości przez długi okres czasu [16] (co jest korzystne przy opracowywaniu wielkotonażowych procesów technologicznych).

Ponadto znajomość zjawisk zachodzących wokół cząstek i znajomość ładunku warstwy podwójnej jest niezwykle istotne przy opracowywaniu mas wieloskładnikowych (kompozytowych: ceramika-ceramika i ceramika-metal), w których efekt heteroflokulacji (przyciągania elektrostatycznego cząstek o przeciwnym ładunku podwójnej warstwy elektrycznej) może wspomóc proces jednorodnego rozprowadzenia składników w objętości wyrobu [5, 7].

Praca naukowa finansowana przez Politechnikę Warszawską

Literatura

[1] Richerson D.W.: Modern Ceramic Engineering, Properties, Processing, and Use in Design, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, (2006).

[2] Koch C.C.: Nanostructured Materials - Processing, Properties and Applications, William Andrew Publishing, NY, (2007).

[3] Falkowski P., Szafran M., Temeriusz A.: „Effect of different substituent groups in monosaccharide ring on viscosity of nanometric alumina suspension", Global Roadmap for Ceramics - ICC2 Proceedings, Verona, June 29 - July 4, (2008).

[4] Szafran M., Falkowski P., Wysocka K.:, „Effect of conformation and structure of sucrose and maltose on the viscosity of nanoalumina suspension", Global Roadmap for Ceramics - ICC2 Proceedings, Verona, June 29 - July 4, (2008).

[5] Szafran M., Bobryk E., Gizowska M., Rosłaniec G., Konopka K.: „Zastosowanie mas lejnych do otrzymywania kompozytów ceramika-metal z gradientem stężenia cząstek metalu", Kompozyty, 7, [3], (2007), 126-129.

[6] Szafran M., Konopka K., Bobryk E., Kurzydłowski K.J.: „Ceramic matrix composites with gradient concentration of metal particles", J. Eur. Ceram. Soc., 27, (2007), 651-654.

[7] Moya M.S., Lopez-Esteban S., Pechorroman C.: „The challenge of ceramic/metal microcomposites and nanocomposites", Mat. Scie., 52, (2007), 1017-1090.

[8] Pampuch R., Haberko K., Kordek M.: Nauka o procesach ceramicznych, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, (1992).

[9] Kucharska L.: Reologiczne i fizykochemiczne podstawy procesów ceramicznych, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, (1976).

[10] Somasundaran P.: Encyclopedia of Surface and Colloid Science, CRC Press, (2006).

[11] Szafran M., Rokicki G.: „Effect of Acrylic-Styrene Copolymer Chemical Structure on the Properties of Ceramic Tapes Obtained by Tape Casting", J. Am. Ceram. Soc., 84, [6], (2001), 1231-35.

[12] Encyklopedia techniczna - Chemia, WNT, Warszawa, (1993).

[13] King A.G.: Ceramic Technology and Processing, NOYES Publications, William Andrew Publishing, Norwich, New York, U.S.A., (2002).

[14] Chibowski S., Paszkiewicz M., Krupa M.: "Investigation of the influence of the polyvinyl alcohol adsorption on the electrical properties of Al2O3 - solution interface, thickness of the adsorption layers of PVA", Powder Techn., 107, (2000), 251-255.

[15] Banno T., Hotta Y., Sano S., Tsuzuki A., Oda K.: „Cake growth control in slip casting", J. Eur. Ceram. Soc., 21, (2001), 879-882.

[16] Millan A.J.,. Gutierrez C.A, Nieto M.I., Moreno R.: „Aging Behavior of Alumina Casting Slip", Am. Ceram. Soc. Bull., 79, [5], (2000), 64-68.

[17] Ferreira J.M.F.: „Role of the Clogging Effect in the Slip Casting Process", J. Eur. Ceram. Soc., 18, (1998), 1161-169.

[18] Olhero S.M., Ferreira J.M.F. „Particle segregation phenomena occurring during the slip casting process", Ceramics Int., 28, (2002), 377-386.

♦